

Е.М.Гуліда, д.т.н., проф., О.О.Смотр (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ТА ВОЛОГОСТІ ЛІСОВОЇ ПІДСТИЛКИ НА ШВИДКІСТЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ

Наведено результати досліджень впливу швидкості вітру та вологості лісової підстилки на швидкість розповсюдження крайки лісової пожежі з використанням повнофакторного експерименту та отриманням математичної моделі.

Сучасний стан проблеми. Аналіз статистичних даних кількості лісових пожеж та площі лісових масивів знищених пожежами в державах Європи та в Україні, зокрема, за останні двадцять років свідчить, що спостерігається тенденція зростання числа лісових пожеж, а також збільшення збитку від них [1, 2]. Для ефективного реагування та боротьби з лісовою пожежею необхідний прогноз динаміки її розвитку. Швидкість руху крайки лісової пожежі є одним з визначальних факторів лісової пожежі. Її розповсюдження залежить від багатьох чинників (метеорологічних умов, рельєфу місцевості, розчленованості лісових масивів, характеру самого лісу). Однак найбільш вагомими факторами, які необхідно враховувати, є швидкість вітру та вологість лісового горючого матеріалу. В роботі [3] розглянуто швидкість розповсюдження пожежі з урахуванням швидкості вітру та вологовмісту, хоча в технічній літературі подається вологість. Детальнішу інформацію наведено у [4], але у вигляді табличних даних. В роботі [5] на підставі експериментальних досліджень отримана математична модель розповсюдження фронту лісової пожежі у вигляді експоненціальної залежності з багатьма чинниками, значення яких відсутні у довідковій літературі.

Мета роботи. Провести експериментальні дослідження впливу швидкості вітру та вологості лісової підстилки на швидкість розповсюдження крайки лісової пожежі з використанням повнофакторного експерименту

Результати експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень використовувалася ділянка лісу розміром 2000x16000мм. Метеорологічні дані на день виконання експериментальних досліджень: хмарна погода з проясненнями; без опадів; вітер північно-західний 3 – 5 м/с; температура повітря вдень - 10,6°C тепла; радіаційна обстановка стабільна (в межах норми - 11 мкР/год). Експериментальні дослідження виконувалися з використанням методу повнофакторного експерименту типу 2². Вказаний тип експерименту вимагає проведення чотирьох дослідів, кожен з яких необхідно повторити двічі. План ділянки лісу для проведення експериментальних досліджень зображено на рис.1.

Вітер створювали з використанням димососу типу ДП-10, а зміну швидкості вітру регулювали за допомогою зміни частоти обертання лопастей димососу за рахунок подачі відповідного тиску води в привід насосу від відцентрового насосу типу ПН-40УВ пожежного автомобіля типу АЦ40(130)63Б. Числові значення технологічних чинників наведені в табл.1 і приймалися такими, щоб вони частково співпадали з реальними умовами. Димосос було встановлено на відстані 6000 мм від початку лісової ділянки, що дозволило забезпечувати рівномірну подачу потоку повітря та зімітувати реальні показники вітру. Підстилка для лісової ділянки готувалася заздалегідь з необхідною вологістю (вологість визначалась на підставі проб лісової підстилки ваговим методом) з опалого листя, яке було доставлено на ділянку лісу в поліетиленових пакетах і розкладено згідно з планом (рис.1). До складу підстилки входили: суха відмерла трава, опале листя дерев і кущів у скрученому вигляді, зелені мохи, напіврозкладена лісова підстилка. Швидкість вітру визначалася чашковим анемометром (ГОСТ 7193-74). Експериментальна ділянка лісу була розбита на рівномірні

масиви розміром 2000х2000 мм (рис.1). При досягненні крайкою лісової пожежі кінця масиву визначався час розповсюдження лісової пожежі за допомогою секундоміра механічного СОСпр.

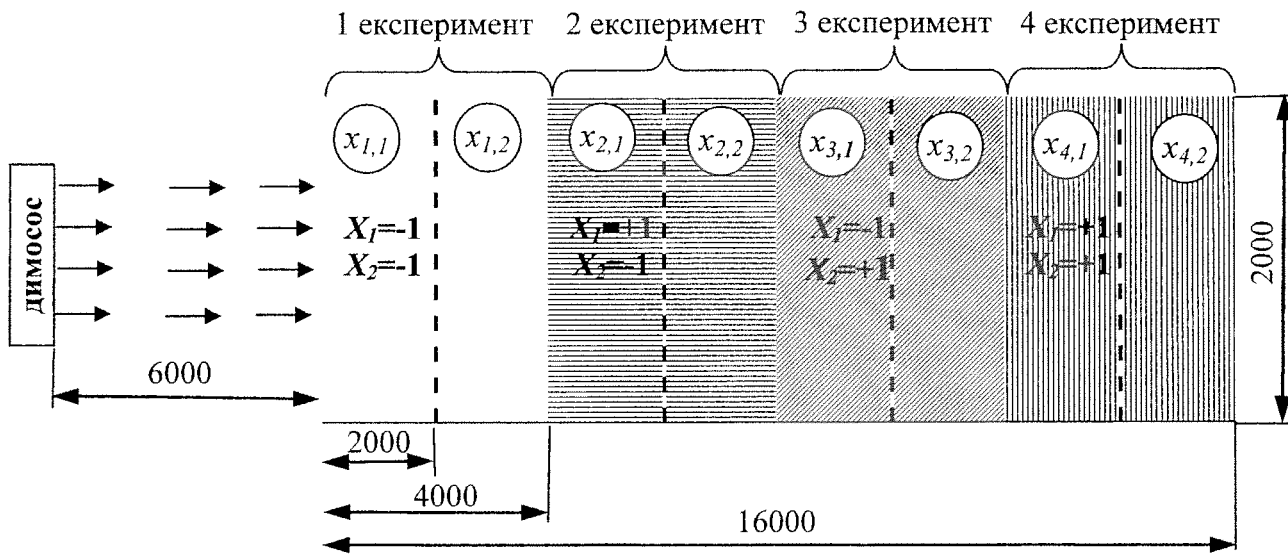


Рис.1. План ділянки лісу для проведення експерименту

Кодування факторів, необхідне для переведу натуральних факторів (швидкості вітру та вологості лісового горючого матеріалу) в безрозмірні величини, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Граничні значення технологічних чинників та їх кодування.

Рівень факторів		Швидкість вітру $V_{вітр}$ м/с	Вологість підстилки, w , %
Назва	Кодове позначення	x_1	x_2
Нижній рівень	-1	2	20
Нульовий рівень (середній)	0	5	55
Верхній рівень	+1	8	90
Інтервал варіювання, δ		3	35

Зв'язок між натуральним і кодовим виразами фактора задається залежністю

$$x_i = \frac{X_i - x_{i_0}}{\delta_i}, \quad (1)$$

де X_i – натуральне значення фактора;

x_{i_0} - значення i -го фактора на нульовому рівні;

δ_i - інтервал варіювання i -го фактора.

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

План-матриця та результати повнофакторного експерименту (ПФЕ) типу 2^2

Дослід	Кодове позначення			Швидкість розповсюдження пожежі y_1 , м/хв	Швидкість розповсюдження пожежі y_2 , м/хв	$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2}{2}$
	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$			
1.	-1	-1	+1	2,79	2,90	2,845
2.	+1	-1	-1	3,90	4,10	4
3.	-1	+1	-1	1,80	1,60	1,7
4.	+1	+1	+1	2,40	2,50	2,45

Перевіряємо відтворюваність результатів експериментальних досліджень за критерієм Кохрена. При однаковій кількості паралельних дослідів при кожній сукупності рівнів чинників процес вважається відтворюваним, якщо виконується нерівність (2)

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)} \quad (2)$$

де $s_u^2 = \sum_{p=1}^m (y_{u,p} - \bar{y}_u)^2$ - дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів при u

сукупності рівнів факторів; $p=1,2,\dots,m$ - кількість паралельних дослідів; $S_{u \max}^2$ - найбільша з дисперсій; $G_{(0.05; f_n; f_u)}$ - табличне значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значимості; $f_n=n$ - число незалежних оцінок дисперсії; $f_u=m-1$ - число ступенів свободи кожної оцінки.

В нашому випадку $n=4$; $m=2$. Отже значення оцінок дисперсії в кожній точці плану розраховуємо за залежністю

$$s_u^2 = \frac{\Delta^2}{2},$$

де Δ - різниця між паралельними дослідями. Таким чином,

$$s_1^2 = \frac{(2.79-2.90)^2}{2} = 0.00605; \quad s_2^2 = \frac{(3.90-4.10)^2}{2} = 0.02;$$

$$s_3^2 = \frac{(1.80-1.60)^2}{2} = 0.02; \quad s_4^2 = \frac{(2.40-2.50)^2}{2} = 0.005;$$

а

$$G = \frac{0.02}{0.00605 + 0.02 + 0.02 + 0.005} = \frac{0.02}{0.051} = 0.3918.$$

Згідно з [6]

$$G_{(0.05;4;1)} = 0.9065.$$

Тоді $G = 0.3918 < G_{(0.05;4;1)} = 0.9065$, що підтверджує відтворюваність дослідів.

При цьому дисперсія відтворюваності (помилка дослідів) визначається так

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}. \quad (3)$$

Тоді

$$s_y^2 = \frac{0.00605 + 0.02 + 0.02 + 0.005}{4} = 0.0128.$$

Визначаємо коефіцієнти регресії відповідно до залежностей (4)-(6):

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}; \quad (4)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n}; \quad (5)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n}; \quad (6)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n} = \frac{2.845 + 4 + 1.7 + 2.45}{4} = 2.75; \quad b_1 = \frac{-2.845 + 4 - 1.7 + 2.45}{4} = 0.48;$$

$$b_2 = \frac{-2.845 - 4 + 1.7 + 2.45}{4} = -0.67; \quad b_{12} = \frac{2.845 - 4 - 1.7 - 2.45}{4} = -0.1.$$

З урахуванням коефіцієнтів регресії отримаємо рівняння у вигляді лінійної моделі

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 = 2.75 + 0.48 \cdot x_1 - 0.67 x_2 - 0.1 x_1 x_2. \quad (7)$$

Перевірку адекватності лінійної моделі (7) виконуємо за допомогою критерію Фішера. Модель є адекватною, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_{(0.05; f_{ad}, f_y)}, \quad (8)$$

$$\text{де } s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1};$$

$F_{(0.05; f_{ad}, f_y)}$ - критерій Фішера при 5%-ному рівні значимості; y_u - розрахункове значення відгуку в u - досліді; $f_{ad} = n - k - 1 = 1$ - число ступенів свободи дисперсії адекватності; $n = 4$ - кількість експериментів; $k = 2$ - кількість факторів (швидкість вітру, вологість); $f_y = 4$ - число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

З отриманого рівняння (7) знаходимо розрахункові значення y_u : $y_1 = 2.843$; $y_2 = 4.005$; $y_3 = 1.697$; $y_4 = 2.455$.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Перевірка адекватності лінійної моделі

Експеримент	\bar{y}_u	y_u	$(\bar{y}_u - y_u)^2$
1.	2.845	2.843	4E-06
2.	4	4.005	2.5E-05
3.	1.7	1.697	9E-06
4.	2.45	2.455	2.5E-05

За результатами табл. 3

$$s_{ad}^2 = \frac{6.3 \cdot 10^{-5}}{4 - 2 - 1} = 6.3 \cdot 10^{-5}; \quad F = \frac{6.3 \cdot 10^{-5}}{0.0128} = 0.004936.$$

Згідно з [6] $F_{(0.05;1,4)} = 7.71$. Тоді $F = 0.004936 < F_{(0.05;1,4)} = 7.71$, що підтверджує адекватність лінійної моделі.

Визначаємо значимість коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значимим, якщо виконується нерівність

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05;f_y)} \frac{s_y}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

де $t_{(0.05;f_y)}$ - п'ятивідсоткова точка розподілу Стьюдента з f_y ступенями свободи

$$\Delta b_i = 2.78 \frac{\sqrt{0.0128}}{\sqrt{4}} = 0.15703$$

Всі визначені коефіцієнти регресії значимі, окрім коефіцієнта b_{12} . Тоді в кінцевому вигляді з використанням кодових позначень отримуємо рівняння

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 = 2.75 + 0.48 \cdot x_1 - 0.67 x_2 \quad (10)$$

В цьому випадку кодові значення згідно із залежністю (1) будуть

$$x_1 = \frac{V_{aim} - 5}{3}; \quad x_2 = \frac{w - 55}{35}.$$

За допомогою цих формул рівняння (10) приводимо до натуральних змінних

$$\begin{aligned} y &= 2.75 + 0.48 \cdot \frac{V_{aim} - 5}{3} - 0.67 \cdot \frac{w - 55}{35} = 2.75 + 0.16 \cdot (V_{aim} - 5) - \\ &- 0.019 \cdot (w - 55) = 2.75 + 0.16 \cdot V_{aim} - 0.8 - 0.019 \cdot w + 1.045 = \\ &= 2.9955 + 0.16 \cdot V_{aim} - 0.019 \cdot w \end{aligned}$$

Таким чином, математична модель для визначення швидкості розповсюдження крайки лісової пожежі V_{Π} матиме вигляд

$$V_{\Pi} = 2.9955 + 0.16 \cdot V_{aim} - 0.019 \cdot w. \quad (11)$$

На підставі отриманої математичної залежності (11) графічно розглянули вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження лісової пожежі при різних значеннях вологості підстилки (рис.2), що дозволило визначити при середньому значенні вологості лісової підстилки ($w=30\%$) співвідношення швидкості вітру (V_{aim}) до швидкості розповсюдження лісової пожежі в наступних межах

$$\xi = \frac{V_{aim}}{V_n} = 0,000129 \dots 0,0258.$$

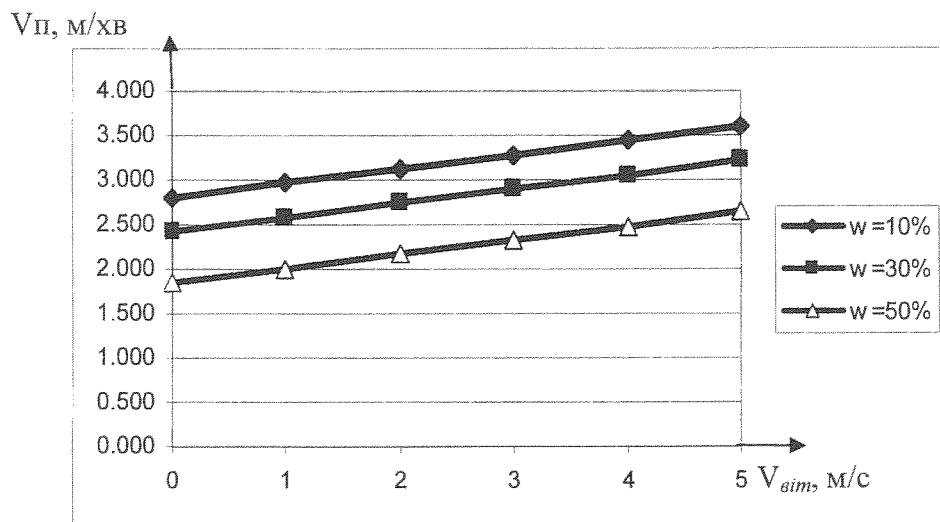


Рис.2. Вплив швидкості вітру на швидкість розповсюдження лісової пожежі при різних значеннях вологості підстилки

Висновки

1. На підставі результатів експериментальних досліджень отримана математична модель для визначення швидкості розповсюдження крайки лісової пожежі, яка дозволяє одночасно враховувати швидкість вітру та вологість лісової підстилки.

2. Для розрахунку швидкості розповсюдження крайки лісової пожежі з використанням детермінованих залежностей [7] необхідно враховувати уточнене значення коефіцієнта ξ .

3. Доцільним є продовження цієї роботи з урахуванням в процесі виконання експериментальних досліджень рельєфу та розчленування місцевості, які впливають на розповсюдження лісової пожежі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні // http://mns.gov.ua/annual_report/2007/content_1.ua.php?m=B5&p=1.
2. Офіційна сторінка National Interagency Fire Center (США) // <http://www.nifc.gov>
3. Доррер Г.А.. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 160 с.
4. Вонский С.М. Интенсивность огня низовых лесных пожаров и ее практическое значение // Сб. тр. ЛенНИИЛХ. – 1957. № 52. – С. 108-117.
5. Rothermel R.C. A mathematical Model for fire Spread Predictions in Wildland Fuels. - Ogden: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. - 1976. – P. 30 -92.
6. Винарский М.С., Лурье М.В.. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. "Техника", 1975. – 168 с.
7. Гуліда Е.М., Смотров О.О. Прогнозування поширення лісових пожеж // Проблеми пожежної безпеки. – Харків: УГЗУ, 2007. – Вып. 21 – С. 73-79.